

ESTUDIO DEL DESARROLLO DE LA RESISTENCIA DE MORTEROS CON ÁRIDO RECICLADO FINO MEDIANTE ULTRASONIDOS Y ESTIMACIÓN DEL AGUA/CEMENTO EFECTIVA

Mirian Velay-Lizancos

Isabel Martínez-Lage

Cristina Vázquez-Herrero

Pablo Vázquez-Burgo

Universidad de A Coruña. Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos

Resumen

El uso de árido reciclado para la fabricación de hormigones y morteros tiene una doble ventaja desde el punto de vista de la sostenibilidad de la construcción. Por una parte, se reduce el volumen de residuos depositados en vertedero. Por otra parte, disminuye la utilización de áridos naturales, lo que conlleva una menor explotación de las canteras. En la normativa española EHE-08, anejo 15 de las recomendaciones para la utilización de árido reciclado de hormigón, se limita a un 20% el porcentaje de sustitución de árido reciclado grueso. La norma no contempla el uso de árido reciclado fino, quedando el uso de este condicionado a estudios específicos para su utilización. Debido a esta exclusión, es interesante tener un mayor control de la resistencia de los morteros y hormigones fabricados con árido reciclado fino.

Por ello, además de haber hecho un estudio de la resistencia a 28 días de morteros con distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado fino, se ha desarrollado un método para el control de la evolución de la resistencia mediante ultrasonidos desde edades tempranas hasta 28 días.

Se han hecho sustituciones del 0%, 20% y 50%. Existen dos variables que afectarán a los resultados de resistencias de estos morteros, una variable es el porcentaje de sustitución, que influyen de forma negativa en la resistencia. La otra variable es la relación agua/cemento efectiva. Debido a que el árido reciclado tiene una mayor absorción, muchos autores apuntan a la necesidad de hacer una corrección del agua, para que la relación agua/cemento efectiva sea la misma. Pese a que, al aumentar el porcentaje de sustitución de árido reciclado, la relación agua/cemento efectiva se reduce, se ha decidido no hacer ninguna corrección del agua debido a la disparidad de teorías acerca de cómo se debe de hacer esta corrección. Para controlar esta variable se ha hecho un estudio con un cementómetro calibrado, para cuantificar la reducción del agua/cemento efectiva debido a la mayor absorción del árido reciclado.

Palabras clave: *árido reciclado fino; mortero autocompactante; ensayos no destructivos; ultrasonidos; Relación a/c efectiva*

Área temática: *Actuaciones sostenibles en la edificación.*

Abstract

The use of fine recycled aggregate for concrete and mortar manufacturing has a double advantage from the view point of construction sustainability. On the one hand, the amount of waste left in landfills has been reduced, and on the other hand, the use of natural aggregates has been reduced, which implies a minor exploitation of the quarries. In the Spanish regulation EHE-08, annex 15 of the recommendations for the utilization of concrete recycled aggregate, the percentage of substitution of coarse aggregate has been limited to 20%. The standard does not consider the use of fine recycled aggregate. Instead, it specifies that studies should be carried out for its utilization. Therefore, it is interesting to have a major control of the compressive strength of mortars and concretes made with fine recycled aggregate.

In addition to the study of 28-days compressive strength of mortar with different percentages of substitution of fine recycled aggregate, we have developed a method for controlling the strength evolution by ultrasound from early ages to 28 days.

Mortars with substitutions of 0 %, 20 % and 50 % were studied. Two variables have influence on the results of compressive strength of these mortars: one variable is the percentage of substitution with negative influence on strength, and another variable is the effective water/cement ratio. Due to the fact that the recycled aggregate has a major absorption, many authors emphasize the need for a correction of water in order to have the same effective water/cement ratio.

In spite of having increased the percentage of substitution of recycled aggregate, effective water/cement ratio was reduced. We have decided not to do any alteration of the water due to the disparity of theories about how this correction should be done. In order to control this variable, a study has been done with a calibrated cementometer to quantify the reduction of the effective water/cement ratio due to the major absorption of the arid recycling.

1. Introducción

El uso de árido reciclado como sustitución del árido natural, para la fabricación de hormigones y morteros, tiene una doble ventaja desde el punto de vista ambiental; por una parte se reduce la ocupación de los vertederos gracias a la reutilización de parte de los RCD que se procesan y se convierten en áridos reciclados de hormigón.

Por otra parte, la sustitución de áridos naturales por estos áridos reciclados, produce una disminución del uso de árido natural y con ello, una menor explotación de las canteras.

Según la normativa española EHE-08, anejo 15 de las recomendaciones para la utilización de árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural, se debe limitar el uso de árido reciclado a un 20% el porcentaje de sustitución de árido reciclado grueso. La norma no contempla el uso de árido reciclado fino, quedando el uso de este condicionado a estudios específicos para su utilización. A causa de esta exclusión, es interesante tener un mayor control de la resistencia de los morteros y hormigones fabricados con árido reciclado fino.

Debido a que el árido reciclado tiene una absorción notablemente mayor a la de la de los áridos naturales, muchos autores hablan de una relación agua-cemento efectiva menor a la relación agua-cemento real, como se ha verificado en campañas experimentales de muchos autores como Evangelista (Evangelista, 2007), Matías y Brito (Matías 2005) y Santos (2002). Para contrarrestar el efecto de la mayor absorción de los áridos reciclados, estos autores apuntan a un incremento de la cantidad de agua proporcional al porcentaje de sustitución de árido reciclado, como se indica en las recomendaciones de Alaejos (Alaejos, 2004) o, por ejemplo, las investigaciones de Sánchez (Sánchez, 2005). Pero cada autor propone una metodología distinta y presuponen una cantidad de agua extra, que no se computa en el cálculo del agua-cemento efectiva y que es proporcional al agua de absorción de los áridos reciclados, aunque cada autor propone unos porcentajes distintos. Puesto que la relación a/c influye en gran medida en el resultado de las resistencias, el parámetro de a/c efectiva es una variable a controlar y a tener en cuenta en el análisis de los resultados.

La estimación de la resistencia a compresión mediante su correlación con la velocidad de ultrasonidos es una práctica común en hormigones y morteros convencionales (Breyse 2012, Beutel 2008). La influencia del porcentaje de sustitución de árido reciclado grueso en las curvas de correlación de hormigones se han estudiado recientemente (Velay, 2014), en los estudios realizados, se ha comprobado que las curvas de correlación para distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado grueso en hormigones, siguen una misma la misma tendencia pero se ven desplazadas paralelamente, por lo que, para un mismo resultado de ultrasonidos, la resistencia correspondiente es distinta según el porcentaje de sustitución pero se puede prever dicha diferencia mediante una función de correlación optimizada que tiene como variables, el tipo de árido reciclado, la velocidad de ultrasonidos, el índice de rebote y el porcentaje de sustitución de árido reciclado grueso.

2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es adquirir un mayor conocimiento y control de las características de los morteros con distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado fino.

Para ello se procederá, por una parte, al estudio de la relación que existe entre el a/c real y el a/c efectiva conforme se aumenta el porcentaje de sustitución de árido reciclado, teniendo en cuenta la absorción de los áridos reciclados y naturales, utilizando para ello un cementómetro James.

Por otra parte, se estudiará la correlación que existe entre la velocidad de ultrasonidos y resistencia a compresión a distintas edades para varios porcentajes de sustitución, con el fin de comprobar si el porcentaje de sustitución de árido reciclado fino influye en la

correlación que hay entre resistencia y velocidad de ultrasonidos. Obtener una única expresión de estimación de la resistencia a compresión mediante dichas correlaciones.

3. Metodología

Se estudian tres dosificaciones con sustituciones de árido reciclado del 0%, 20% y 50%. Se han hecho 9 amasadas de 1.5 litros cada una, para cada porcentaje de sustitución. A continuación se muestran las fotografías de los materiales empleados (Figura 1).

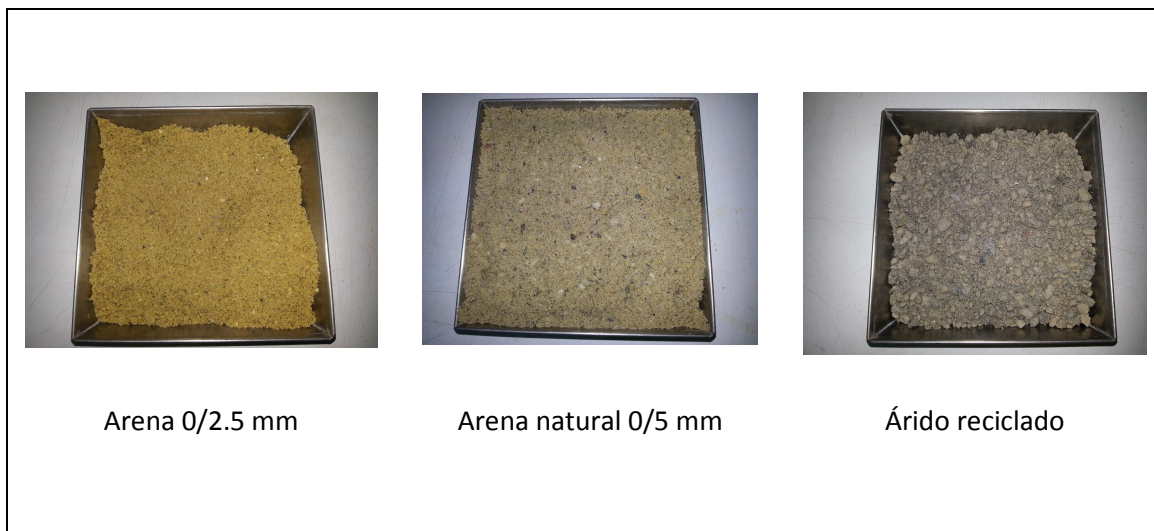


Figura 1: Fotografías de áridos utilizados

El árido reciclado, procedente del machaqueo de piezas prefabricadas de hormigón, llega al laboratorio con una granulometría 0/12 mm. Una vez se hacen los ensayos de caracterización, se observa que el 40% del árido tiene una granulometría inferior a 4 mm. Este árido se tamiza para separar la arena reciclada del árido grueso reciclado. Para los ensayos de mortero se utiliza la fracción 0/4 mm resultante de este tamizado.

La relación a/c real de todas las amasadas es de 0.5, en cada una de las 27 amasadas se hacen varias medidas con el cementómetro y se halla la media de la relación a/c efectiva medida por dicho aparato.

Como indica el propio manual del aparato, el cementómetro mide la de humedad por microondas, utiliza un sensor con dos puntas para medir la constante dieléctrica compleja del material en contacto con las sondas. Dado que la constante dieléctrica del agua es entre cuatro y ocho veces mayor que la mayoría de los aditivos y tipos de cemento, los cambios en la relación agua/cemento afectan directamente el resultado que informa el sensor. Se hace una calibración de dicho aparato tomando como base un mortero convencional con distintas relaciones agua/cemento.

Con el fin de controlar esta variable se hace un estudio con un cementómetro y se compara con la relación agua/cemento efectiva definida como la relación entre el agua descontando el agua extra que absorben los áridos reciclados (tomando como absorción

“extra” la absorción de los áridos reciclados menos la absorción de los áridos naturales sustituidos) y el cemento.

Las probetas de mortero se curan a 20 °C sumergidas en agua. Se ensayan tres probetas de cada dosificación a edades de 1, 2, 3, 4, 7 y 28 días.

En primer lugar, justo antes de proceder a la rotura de las probetas, se efectúan tres mediadas de la velocidad de ultrasonidos con disposición directa, una de ellas en el centro y las otras dos centradas a cuatro centímetros del centro, palpadores de 150 Hz. La media resultante de esas tres medidas es el valor que se toma como velocidad de ultrasonidos de la probeta.

Cada probeta de mortero se rompe a flexión en dos mitades. Posteriormente, cada mitad de se rompe a compresión. La media de los dos resultados de resistencia a compresión es el valor que se toma como resistencia a compresión de la probeta.

4. Resultados y análisis de resultados

4.1 Resultados de los ensayos destructivos

A continuación se muestran los resultados obtenidos para las distintas dosificaciones, a todas las edades ensayadas (Figura 2). Así mismo, se muestra la evolución de la resistencia a compresión para cada una de las dosificaciones (Figura 3).

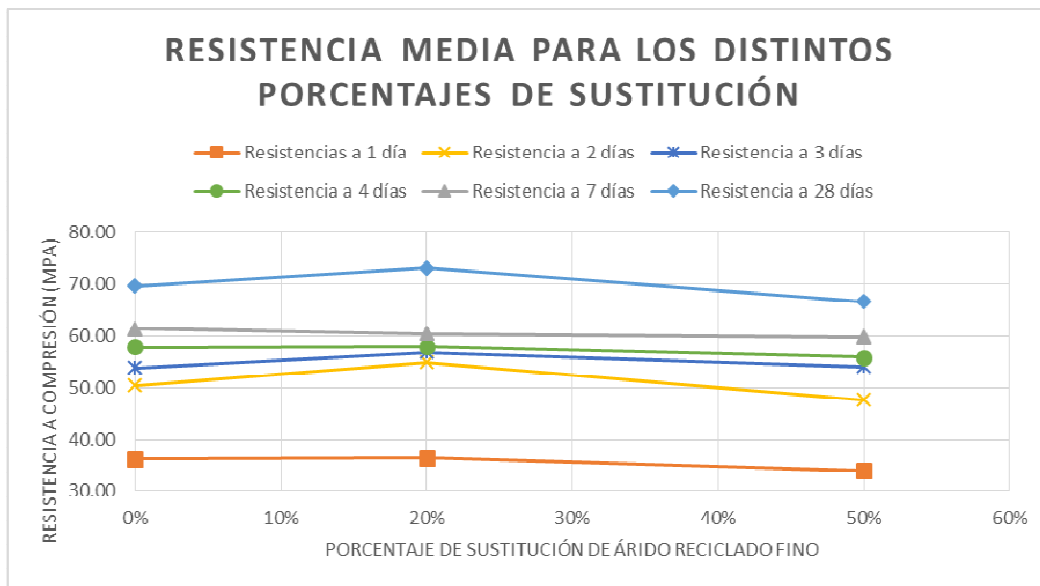


Figura 2: Resistencia media para los distintos porcentajes de sustitución

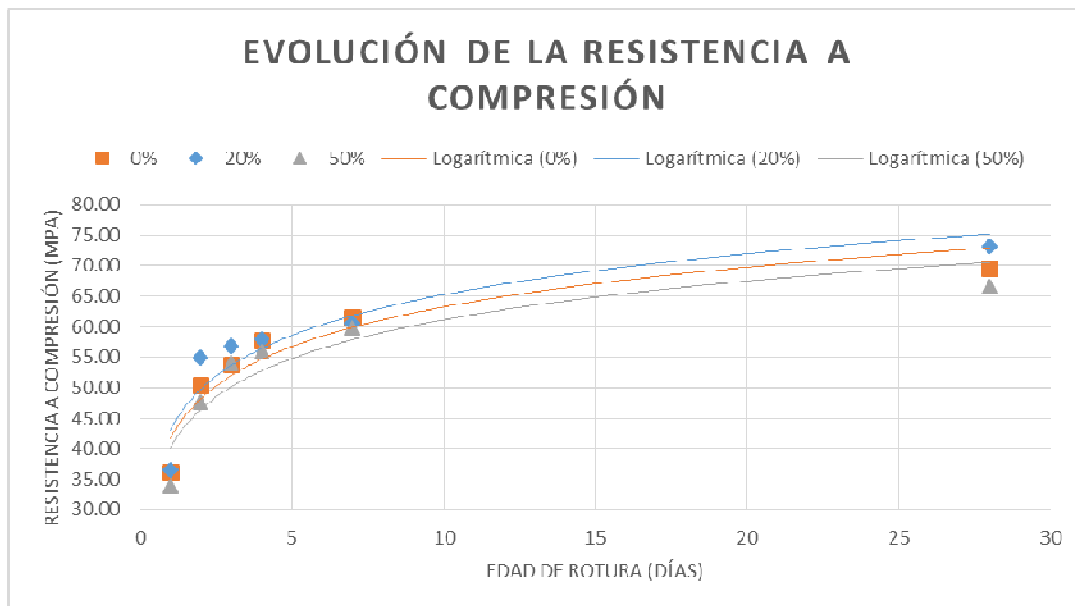


Figura 3: Evolución de la resistencia a compresión

Se podría pensar que los resultados no son coherentes ya que para el 20% de sustitución la resistencia aumenta y con el 50% de sustitución, la resistencia disminuye. Pero en realidad existen dos variables que afectarán a los resultados de resistencias de estos morteros:

- El porcentaje de sustitución: A mayor porcentaje de sustitución, la resistencia será menor debido a la menor, debido, en gran parte, a la menor resistencia mecánica del árido reciclado.
- La relación agua/cemento efectiva: Debido a que el árido reciclado tiene una mayor absorción, muchos autores apuntan a la necesidad de hacer una corrección del agua, para que la relación agua/cemento efectiva sea la misma. Pese a que, al aumentar el porcentaje de sustitución de árido reciclado, la relación agua/cemento efectiva se reduce, se ha decidido no hacer ninguna corrección del agua debido a la disparidad de teorías acerca de cómo se debe de hacer esta corrección. Se hace un estudio midiendo la relación agua/cemento efectiva con él y, posteriormente se compara a la resultante si se toma el agua efectiva como el agua total menos el agua absorbida por los áridos reciclados más el agua que absorberían los áridos naturales que han sido sustituidos.

4.2 Resultados de la estimación de a/c efectiva

A continuación se muestra una tabla con los de estimación de la relación a/c efectiva, obtenidos por los dos métodos.

Para el cálculo de la relación a/c efectiva con el cementómetro se ha hecho anteriormente una calibración del mismo para la dosificación del 0%.

Para el cálculo de la relación a/c efectiva teniendo en cuenta la absorción de los materiales, los datos son siguientes:

- La absorción del árido reciclado fino es del 6.73%
- La absorción de la arena 0/5 mm es del 0.30%

- Por tanto, se toma como absorción “extra” para descontar el agua que absorben los áridos reciclados la diferencia entre ambas, es decir, 6.43%.

De este modo, los resultados obtenidos son los que muestra la siguiente tabla:

Tabla 1: Resultados de la relación a/c efectiva

Porcentaje de sustitución	0%	20%	50%
Cemento	502.5	502.5	502.5
Agua real	251.25	251.25	251.25
Agua descontando absorción extra AR	251.25	239.49	222.55
Agua efectiva según cementómetro	251.25	231.15	216.075
a/c real	0.5	0.5	0.5
a/c descontando absorción extra AR	0.5	0.48	0.44
a/c efectiva según cementómetro	0.5	0.46	0.43

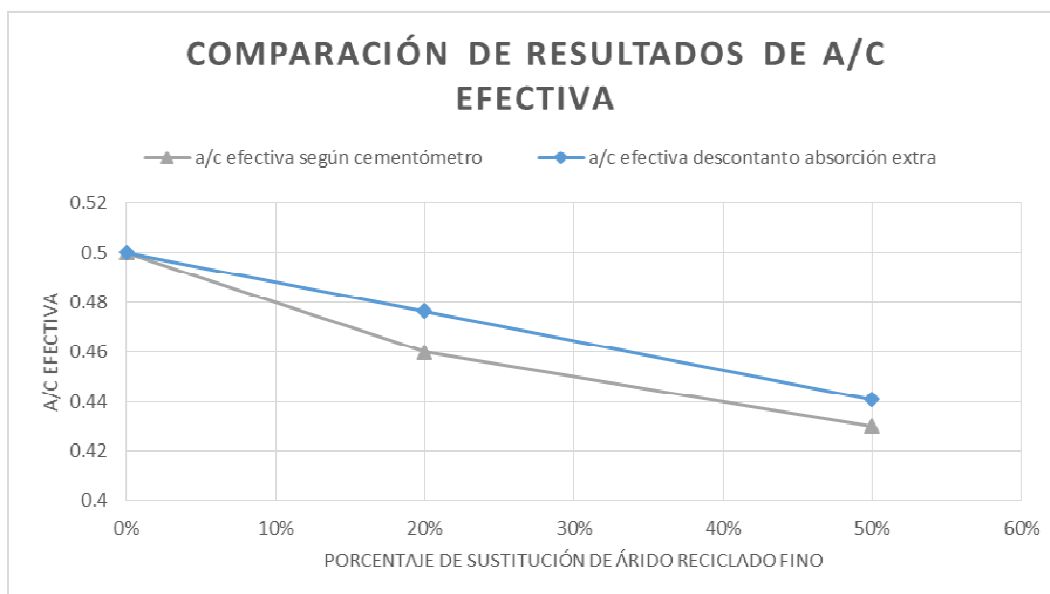


Figura 4: Gráfico comparativo de los resultados de a/c efectivas

La relación a/c efectiva resultante de los dos métodos es similar, un poco inferior con el método del cementómetro.

Se comprueba que, con este método, el agua efectiva calculada es ligeramente inferior a la obtenida con el método de la absorción, pero la diferencia es muy pequeña. Por ello, para futuras *investigaciones*, se hará la corrección del agua según el método de la absorción, por ser este el que se puede hacer a priori.

Y, durante las amasadas se corroborará que la corrección del agua es válida con medidas en fresco mediante el método del cementómetro. Pudiendo así, acotar el

efecto que tiene en la resistencia el uso del árido reciclado ya que el parámetro a/c estaría controlado y ajustado para que no influyese en los resultados.

4.3 Resultados de las correlaciones entre ultrasonidos y resistencia a compresión

A continuación se muestran las correlaciones obtenidas de la resistencia a compresión con ultrasonidos para las distintas dosificaciones.

Con los resultados obtenidos en la campaña experimental, cuyas medias se presentan en la siguiente tabla (Tabla 2), se hallan correlaciones con aproximaciones exponencial y lineal.

Tabla 2: Tabla de resultados obtenidos

% DE SUSTITUCIÓN	EDAD	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)	VELOCIDAD ULTRASONIDOS (m/s)
0%	1 día	36.20	4255
	2 días	50.43	4494
	3 días	53.79	4620
	4 días	57.86	4762
	7 días	61.45	4762
	28 días	69.60	5063
20%	1 día	36.46	4163
	2 días	54.88	4404
	3 días	56.85	4494
	4 días	58.00	4620
	7 días	60.51	4762
	28 días	73.17	4920
50%	1 día	33.98	4040
	2 días	47.62	4308
	3 días	54.04	4494
	4 días	55.82	4554
	7 días	59.77	4524
	28 días	66.64	4762

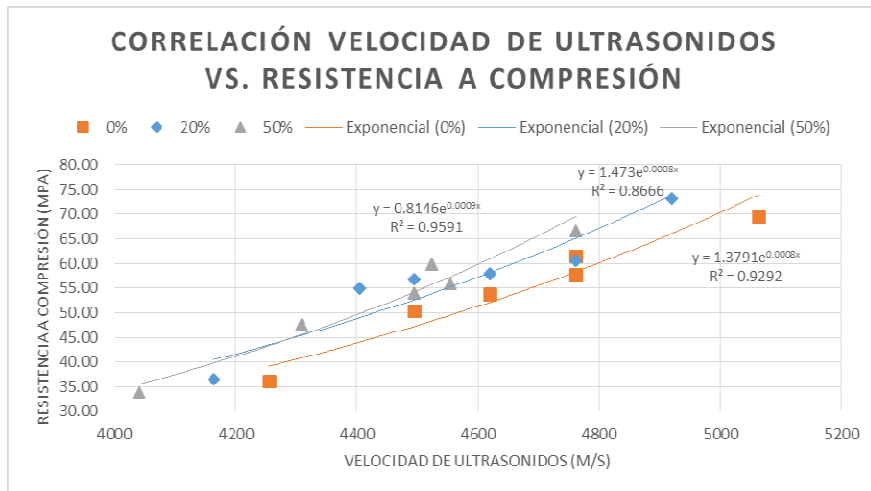


Figura 5: Gráfico comparativo de las correlaciones de resistencia vs ultrasonidos con aproximación exponencial

Como podemos observar en la figura 5, las correlaciones obtenidas para las distintas dosificaciones son similares, pero se desplazan ligeramente hacia arriba al aumentar el porcentaje de sustitución, de modo que, para una misma velocidad de ultrasonidos, la resistencia que corresponde es mayor si el ensayo se corresponde a probetas con un mayor porcentaje de sustitución. Esto puede ser debido al efecto de reducción de la relación a/c debido a la absorción del árido. En estudios recientes (Velay, 2014) se ha comprobado en hormigones que, si se corrige el agua para obtener una relación agua/cemento efectiva igual en las tres dosificaciones, las correlaciones son similares, pero las curvas ascienden ligeramente al disminuir el porcentaje de sustitución.

Se comprueba que se pueden hallar correlaciones muy aceptables con aproximación lineal, como podemos observar en la siguiente figura.

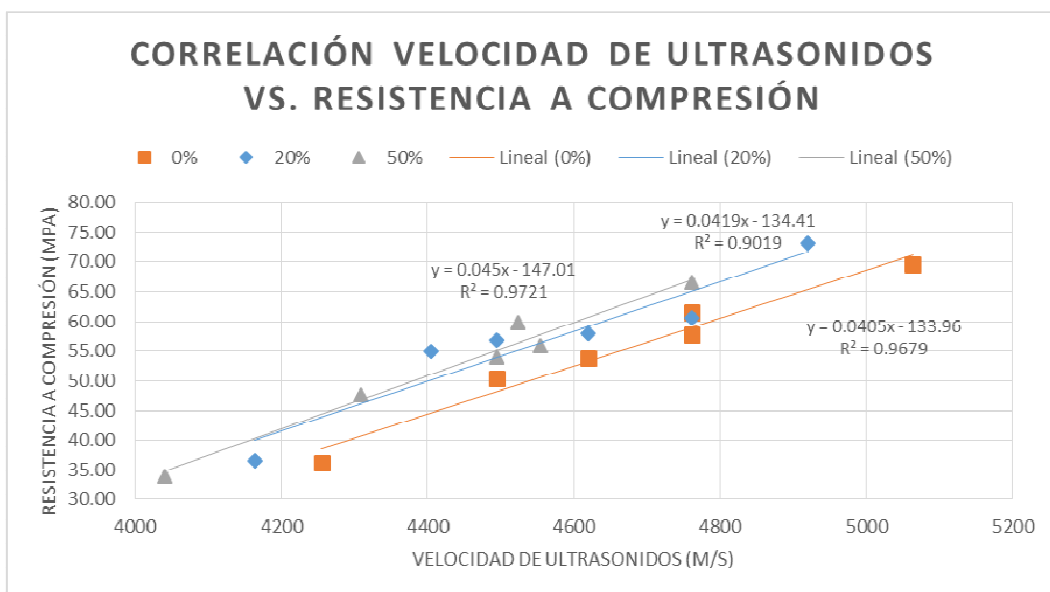


Figura 6: Gráfico comparativo de las correlaciones de resistencia vs ultrasonidos con aproximación lineal

Se ha obtenido una formulación para hallar la resistencia estimada según el porcentaje de sustitución y la velocidad de ultrasonidos. Para ello se ha propuesto la siguiente formulación de combinación lineal:

$$\text{Resistencia estimada} = \alpha * \text{velocidad del ultrasonidos} + \beta * \% \text{de sustitución} + \lambda$$

La velocidad de ultrasonidos está en km/s para que los coeficientes resultantes fuesen del mismo orden. El porcentaje de sustitución se introduce en tanto por ciento. Se calculan los valores de los coeficientes α , β , λ que optimicen la función haciendo mínimo el error mínimo cuadrático.

La ecuación obtenida de dicha optimización por el método de mínimos cuadrados es:

$$\text{Resistencia estimada} = 43.63 * \text{velocidad del ultrasonidos} + 14.42 * \% \text{de sustitución} - 147.97$$

Para comprobar que esta estimación es aceptable, se representa la resistencia real frente a la resistencia estimada y se comprueba que todos los puntos están dentro del uso de error de +/-10% (Figura 7), por ser este error del 10% una desviación aceptada generalmente en los controles de calidad de materiales heterogéneos similares, como en el hormigón, véase el artículo 88.5 de la EHE, donde los lotes se aceptan automáticamente si su resistencia es mayor o igual al 90% de la resistencia característica.

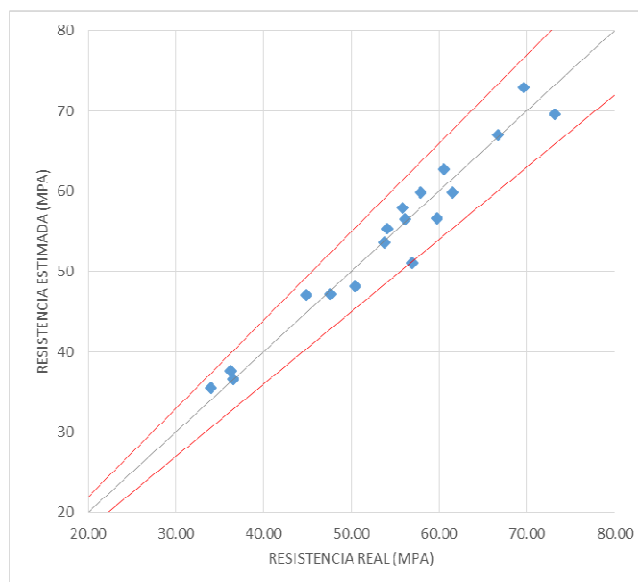


Figura 7: Gráfico comparativo de la resistencia real frente a la resistencia estimada

5. Conclusiones y futuros trabajos

La variación de la resistencia a compresión de los morteros con distintos porcentajes de sustitución de árido reciclado depende en gran medida de dos variables: el propio porcentaje de sustitución y de la relación agua/cemento efectiva. Si no se tiene en cuenta la mayor absorción del árido reciclado y se mantiene constante la relación agua/cemento real para las dosificaciones con distintos porcentajes de sustitución, los resultados de resistencia obtenidos estarán influenciados por ambas variables.

La influencia conjunta de estas dos variables hace que la resistencia a compresión de los morteros con el 20% de sustitución sea mayor que la de referencia (la del 0%). Esto es debido a que, aunque la menor resistencia del árido reciclado influye de forma negativa en la resistencia, su mayor absorción hace la que relación agua/cemento efectiva sea menor, por lo que la trabajabilidad se reduce pero la resistencia, aumenta. En el caso del 20% de sustitución, la influencia de la reducción del agua/cemento efectiva en la resistencia es mayor que la influencia que tiene la menor resistencia el árido reciclado en sí, por lo que la resistencia aumenta.

Cuando se aumenta el porcentaje de sustitución hasta el 50%, la influencia de la menor resistencia de los áridos reciclados es ligeramente mayor que la influencia de la reducción de la relación agua/cemento, por lo que las probetas con el 50% de sustitución tienen una resistencia ligeramente inferior a las de referencia.

La relación agua/cemento efectiva se ve afectada por el porcentaje de sustitución de árido reciclado debido a la mayor absorción de éste en relación a la absorción de los áridos naturales. Para que se pueda controlar la influencia en la resistencia del porcentaje de sustitución de árido reciclado, debido a la menor resistencia mecánica del árido reciclado, es necesario hacer una corrección de la relación agua/cemento de modo que la relación agua/cemento efectiva sea la misma para las dosificaciones con distintos porcentajes de sustitución. Pero para que los resultados sean comparables y se pueda estudiar la influencia de la utilización del árido reciclado, es necesario definir de forma correcta el ratio agua/cemento efectivo.

Se ha hecho la hipótesis de que la disminución del agua disponible para reaccionar con el cemento es prácticamente la misma que la cantidad de agua absorbida por los áridos reciclados menos la cantidad de agua que absorberían los áridos naturales sustituidos. Esta hipótesis se contrasta gracias a los resultados obtenidos con el cementómetro, aparato de medida que mide la relación agua/cemento real para morteros y hormigones convencionales. Se han comparado los del ratio agua/cemento obtenidos con el aparato de medida y los calculados según la hipótesis y los resultados obtenidos se aproximan mucho, un poco inferiores en el caso de los datos obtenidos con el cementómetro.

En cuanto a las correlaciones obtenidas entre la resistencia a compresión y la velocidad de ultrasonidos, se observa que las curvas de correlación de las distintas dosificaciones se desplazan ligeramente hacia arriba al aumentar el porcentaje de sustitución, de modo que, para una misma velocidad de ultrasonidos, la resistencia que corresponde es mayor si el ensayo se corresponde a probetas con un mayor porcentaje de sustitución. Estos resultados contradicen a otros estudios hechos en hormigones con áridos reciclados, en los que ocurre lo opuesto. Esto es debido a que, en este caso, no se han hecho

correcciones de la relación agua/cemento efectiva y esto influye de manera muy importante en las correlaciones.

Se comprueba que, pese a las dos variables que influyen en la resistencia, se puede hallar una correlación conjunta para la estimación de la resistencia a compresión teniendo en cuenta el porcentaje de sustitución y la velocidad de ultrasonidos. Los resultados obtenidos de resistencia estimada tienen un error menor al 10%. Pese a ello, observando los coeficientes calculados en la optimización, se comprueba que el coeficiente que multiplica al porcentaje de sustitución es positivo, eso sería un indicador de que, el porcentaje de sustitución es un factor positivo para la resistencia. Esto ocurre debido a que a mayor porcentaje de sustitución, menor es la relación agua/cemento efectiva, ya que la absorción de los áridos es mayor y no se han hecho correcciones del agua para mitigar este efecto.

Una vez se ha definido en este estudio la relación agua/cemento efectiva mediante dos métodos y se ha comprobado que sus resultados son prácticamente iguales, se están estudiando en la actualidad morteros con las mismas dosificaciones pero que con las correcciones de agua/cemento que se han definido en este estudio.

En este estudio que se está llevando a cabo en la actualidad se harán los mismos ensayos con ultrasonidos con el fin de comprobar que el desplazamientos de las curvas de correlación varía hacer las correcciones del agua y, comparando así, morteros en las que el parámetro que varía la resistencia es el porcentaje de sustitución, independientemente de la absorción de los áridos y, por ende, de la relación agua/cemento efectiva.

6. Referencias

ALAEJOS P., Sánchez M., "Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete", International RILEM Conference on the use of recycled materials in buildings and structures, Barcelona, pp. 693-712 (2004).

BEUTEL, R. Comparative Performance Test and Validation of NDT Methods for Concrete Testing. Journal Nondestruct Eval. Vol. 27:59-67 (2008)

BREYSSE, D. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review an a new perspective by combining NDT methods. Construction and Building Materials. Vol.33:139-163 (2012)

EVANGELISTA L., "Desempenho de betões executados com agregados finos reciclados de betão", Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa (2007)

MATIAS D., Brito J. de, "Influência dos adjuvantes no desempenho de betões com agregados grossos reciclados de betão", Relatório ICIST DTC n.º 3/05, Instituto Superior Técnico, Lisboa. (2005).

SÁNCHEZ, M. J. Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural. Tesis (Doctoral) – Departamento de Ingeniería Civil: Construcción perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos en España. (2005)

SANTOS J. R., Brito J. de, Gonçalves A. P. y Branco F. A., "Campanha experimental efectuada no IST", Seminário "Betão para a Construção Sustentável", APEB, Lisboa (2002)

VELAY, M. Influencia de los áridos reciclados en la relación de ensayos no destructivos frente a propiedades físicas del hormigón. Congreso Iberoamericano Rehabent, (2014).

Correspondencia (Para más información contacte con):

Nombre y Apellido: María Mirian Velay-Lizancos
Teléfono: +34981 167 000 Ext. 5424
E-mail: m.velay@udc.es